

초정밀 마이크로 위치결정 스테이지의 제작 및 평가

한창수*(한국기계연구원), 백석(충남대학교), 노명규(충남대학교), 이찬홍(한국기계연구원)

Experiment of the precision micro-positioning stage

C. S. Han(KIMM), S. Paek(Choong-Nam Univ.), M.K. No(Choong-Nam Univ.), C. H. Lee(KIMM)

ABSTRACT

The performance of the precision micro-positioning 4-dof stage is presented. The compact design utilizes the monolithic mechanism to achieve the translation in the Z axis and rotation in the θ_z , θ_x and θ_y axes with high stiffness and high damping. Hysteresis, nonlinearity, and drift of the piezoelectric effects are improved by incorporating the sensors in a feedback control. Experiments demonstrate that the micro-positioning stage is capable of a 2nm resolution over the travel range of 25 μ m in the Z axis, 0.017 μ rad resolution over the 170 μ rad in the θ_z and 0.011 μ rad resolution over the 111 μ rad in the θ_x and θ_y axes. The cross-axis interferences among the axes are at a noise range. This stage is available for positioning error compensation of the XY stage with large stroke.

Key words : Micro-positioning (마이크로 위치결정), Flexure hinge (유연 힌지), Piezoelectric actuator (압전 구동기), Capacitance sensor(용량형 센서)

1. 서론

초정밀 위치 결정기구(마이크로 위치결정)는 미세가공 및 미세측정 분야에서의 핵심 장치이다. 본 연구에서는 Fig. 1 과 같은 새로운 4 개의 자유도를 갖는 마이크로 위치결정 스테이지를 제안하며, 스테이지의 설계와 모델링 그리고 해석은 “초정밀 마이크로 위치결정 스테이지의 설계”⁽¹⁾에 설명하였으며 본 논문에서는 제작한 실험장치를 통하여 정적, 동적 실험결과를 측정하여 이론적인 모델의 해석결과와 비교 하였다. 그러나 이전에 해석된 내용에서의 힌지 구조나 크기가 실제 제작된 것과 약간 다르기 때문에 이전 논문과 직접적인 비교는 어려우며, 본 논문에서 이에 대한 비교를 새롭게 정리하였다. 본 연구에서의 마이크로 위치결정 스테이지는 나노 미터의 고정밀도 및 높은 강성 그리고 고 부하능력을 목표로 제작되었다.

2. 실험

2.1 4 축 스테이지의 구성

2.1.1 4 축 스테이지의 제작

4 축 스테이지의 제작은 간단 하면서도 많은 장점을 가진 정밀 방전 가공(EDM)을 통한 일체형 가공법을 채택 하여 단일 알루미늄(Al 7075 T6) 원판에 유연 힌지(flexure hinge), 압전 구동기(piezoelectric actuator) 및 센서의 부착을 위한 부분을 생성 하였으며, 이 원판을 중심으로 2 개의 압전 구동기가 대칭으로 설치되어 θ_z 의 구동을 하게 되며, 스테이지 원판과 하판 사이에는 θ_x , θ_y , Z 축의 구동을 위한 3 개의 독립적인 압전 구동기가 설치된다. 불필요한 축간의 상호간섭을 막기위해 각 부품의 가공정밀도는 세심하게 유지 되었다. 특별히 스테이지의 운동에 가장 결정적인 역할을 하는 유연 힌지의 두께 및 압전 구동기의 위치는 매우 정밀하게 가공되었다. 또한 압전 구동기의 설치하는 스테이지의 성능의 결정 및 압전 구동기의 수명에 매우 중요한 영향을 미치게 되므로 압전 구동기의 접촉부분은 항상 정밀하게 유지되어야 한다.

2.1.2 용량형 센서

각 축의 변위는 비접촉식 정전 용량형 센서(Capacitance sensor, ADE 3901)로 측정하였다. θ_z 측정용 및 수직으로 설치된 θ_x , θ_y , Z 압전 구

동기의 변위 측정용 센서는 Abbe 에러를 최소한으로 줄이기 위하여 압전 구동기에 일직선이 되도록 설치하였다.

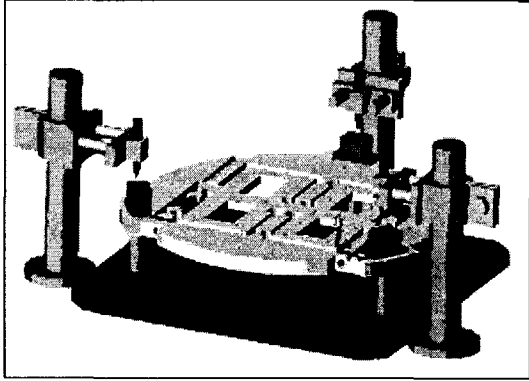


Fig.1 Schematic representation for micro-positioning stage

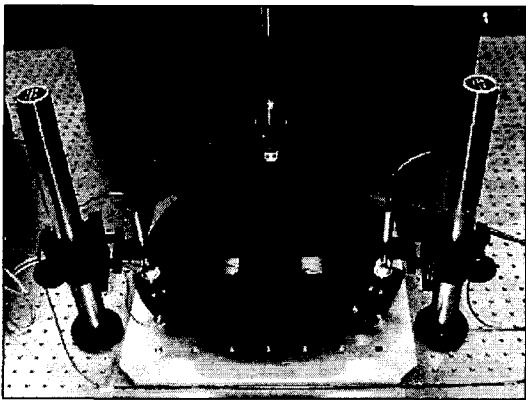


Fig.2 Picture of the micro-positioning Stage

2.1.3 압전 구동기

스테이지에 사용된 압전 구동기는 상대적으로 작은 전압에서 큰 변위를 얻어낼 수 있는 예압이 적용된 다층형 압전 소자를 이용하여 $37 \times \phi 10 \text{ mm}^3$ 의 크기를 갖고 구동범위는 제작 시 $25 \mu\text{m}/500\text{V}$ 이다. 압전 소자의 특성상 이력현상(hysteresis) 및 크리프(creep) 특성이 나타나는데 이와 같은 비선형적인 특성은 폐회로 제어에 의해 충분히 제거 시킬 수 있다.

2.2 실험장치의 구성

스테이지는 Fig. 3 과 같이 제어부, 구동부 그리고 측정부로 나눌 수 있다.

제어부는 MATLAB 의 SIMULINK 를 이용한 DSP (dSPACE DS1005)를 이용하여 개회로(open loop)

및 폐회로(closed loop) 제어 실험을 수행하였다. 또한 Signal Analyzer HP35670A 를 사용하여 시스템의 주파수 응답특성을 각 축에 대하여 측정 하였다.

시스템의 구동 시 외부환경의 영향을 최대한 줄이기 위하여 시스템은 Air Table 위에 장착 되었으며, 차폐막을 설치하여 소음의 영향을 줄였다.

A/D 는 14bit, D/A 는 16bit 의 성능을 가지며, 센서의 측정 범위를 고려할 때, 0.5nm 이하가 된다. 이 실험에서 공기 table 의 진동, 전기적 노이즈 등에 의한 것으로 Fig. 4 와 같이 1nm 수준으로 센서의 한계치에 이르고 있다.

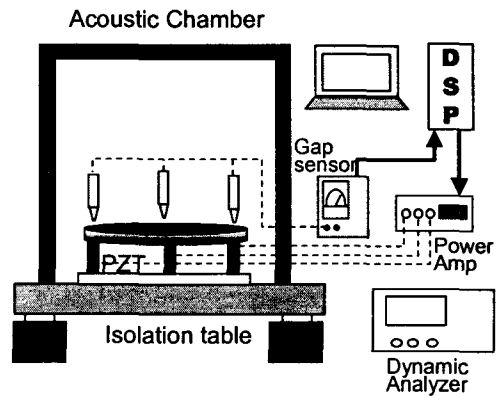


Fig. 3 Experimental Set-up

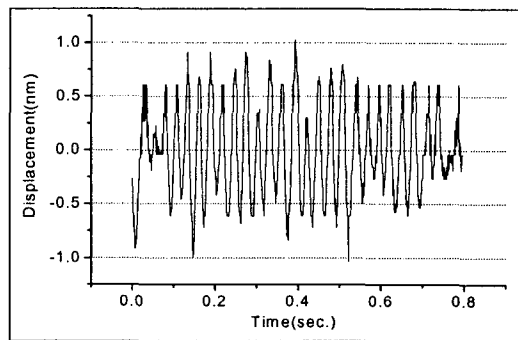


Fig. 4 Noise level detected by sensor

2.3 4 축 스테이지의 성능평가

2.3.1 정적 특성 결과

스테이지의 정적 특성을 파악 하기 위하여 Fig 5 의 계단과 입력에 대한 결과를 보면 입력전압에 대한 출력이 균일하지 못하고 각 전압에 대하여 출력이 다르다는 것을 볼 수가 있다. 이는 압전소자의 이력특성에 기인한 것이다. 또한 Fig.6 의 각 전압별 Step Input 의 응답특성을 보면 과도구간 이후 정상 상태에 도달하는 과정에서의 크리프 특성을 볼 수 있다. 따라서 이러한 비선형적 특성을

보상하기 위해 feedback 제어가 필요하게 된다.

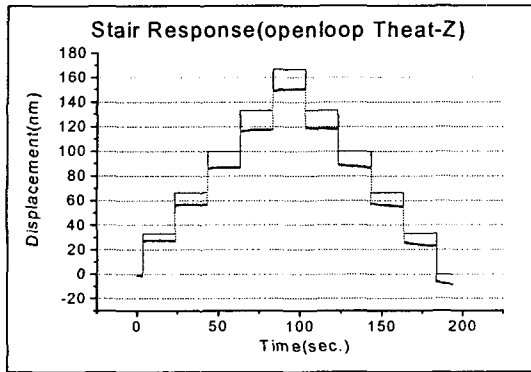


Fig.5 Open-loop stair response of the θ z stage

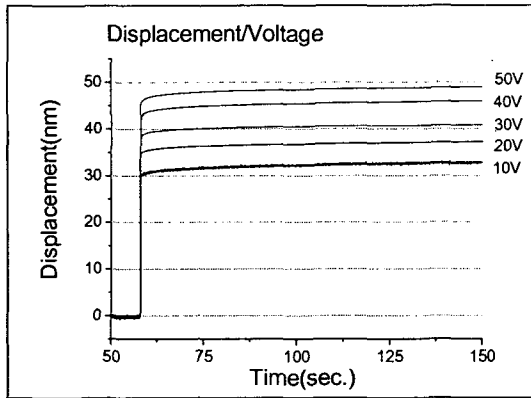


Fig.6 Creep characteristic of the θ z stage

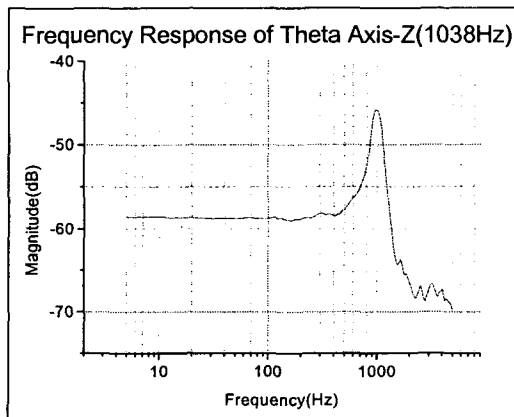


Fig. 7 Frequency Response Characteristic

2.3.2 주파수 응답 특성 결과

주파수 응답특성을 측정하기 위하여 HP35670A

를 사용하여 각 축에 대해 측정하였다. 이 중에서 θ_z 에 관한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 또한 θ_x , θ_y , Z 축에 대해서도 측정하였다. 그런데, 이러한 측정결과에서 정확한 공진주파수를 찾아내기는 어려운 것으로 나타났다. 이는 θ_z 축과는 달리 θ_x , θ_y , Z 축의 측정 시에 압전 구동기와 스테이지의 연결부위에 의한 진동이 유입되고, 또한 압전 구동기 내부의 예압 스프링의 진동과 힌지의 진동이 모두 나타나게 되어 정확한 공진주파수의 판별이 어렵게 되었다. 다만 공기테이블의 진동과 센서 고정 스탠드의 진동과 같은 것은 실험에 의해 정확히 위치를 찾아낼 수 있기 때문에 문제가 되지 않지만 그 이외의 진동에 대해서는 아직 보다 세밀한 검토의 여지가 남아있다. 그리고 측정된 주파수 대역이 100Hz 이내에서는 공진이 발생하지 않으므로 현재 사용하고자 하는 제어대역으로 충분함을 확인할 수 있었다.

2.3.3 Feed-back 제어에 의한 동특성 결과

시스템의 정적특성 측정결과 예측대로 이력 특성 및 크리프 특성을 보상하기 위해 Fig. 8에서와 같이 전형적인 폐회로 기법인 PID 제어기법에 의해 제어를 함으로서 원하는 목표 값에 정확하면서도 빠른 시간에 수렴하도록 하였다.

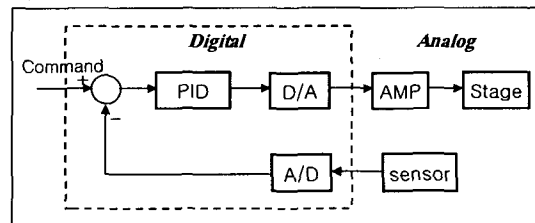


Fig. 8 Diagram of feedback control loop

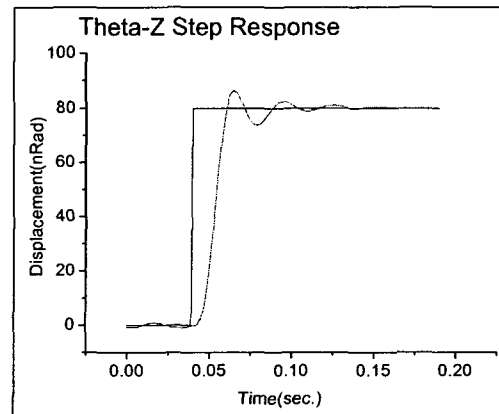


Fig.9 Step Response in the case of closed loop control

PID gain은 Ziegler Nichols Method를 이용하여 구한 후 시행착오법을 병행하여 적절한 값을 택하

였다.

먼저 Step 입력을 가하여 응답특성을 살펴보면, 각 축별로 Fig.9 와 같은 결과를 얻을 수 있다. 정상 상태에 도달하는 시간은 약 100msec 이며, 압전 구동기의 크리프 특성이 완벽하게 제거 된 것을 볼 수 있다. 그리고 스테이지의 Resolution 은 이론상으론 센서의 분해능인 1nm 이어야 하지만 측정 시 발생하는 노이즈 영향에 의해 2nm 수준으로 유지되었다. 이는 센서 고정부의 흔들림, 스테이지의 잔류진동 등에 의한 것으로 판단된다. Fig.11 은 스테이지가 최소 분해능인 2nm step 으로 계단 입력에 따른 출력을 나타낸다.

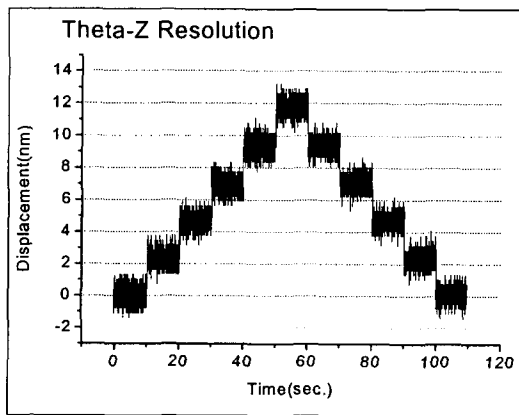


Fig.11 Resolution output for stair input under the closed loop control

3. 결론

4 축 마이크로 위치결정 스테이지를 개발하였다. 이 스테이지는 feedback 제어에 의해 직선 구동범위 25 μm 에 대해 최소 분해능이 2nm 이고, 각 구동범위 110 μrad 에 대해 최소분해능 0.01 μrad 을 실현하였다. 또한, 각 축 방향으로 주파수 응답 특성을 측정 한 결과 1 차 공진 주파수가 100Hz 를 훨씬 넘으므로 제어 대역을 확보하는데 문제가 없었으며, 단위 계단응답 실험을 한 결과 약 25ms 의 settling time 을 가짐을 알 수 있었다. 개발된 스테이지는 큰 구동영역을 갖는 반도체 장비의 스테이지 위에 장착하여 4 축 방향의 위치를 보상하는 장치로 사용될 수 있다.

추후로는 본 연구에서 미비했던 주파수 응답관련 부분을 보완하고, 새로운 압전 구동기를 설계하여 보다 안정된 시스템을 구축하고자 한다.

후 기

이 연구는 한국기계연구원의 기관고유사업과 파기부의 국가지정연구실 사업의 일환으로 이루어 졌음을 밝힙니다.

참고문헌

1. 한창수, 이찬홍 “초정밀 위치결정 마이크로 스테이지의 설계,” 한국정밀공학회 추계학술대회, pp. 428 - 437, 2001.